

ANTONINA SIÓŁKOWSKA

DETEKCJA MIONÓW ZA POMOCĄ TUB GEIGERA-MÜLLERA

Wyróżniona pierwszym miejscem w konkursie „Fizyczne Ścieżki” (kat. Pokaz zjawiska fizycznego) praca pokazuje, że fizykę cząstek można przybliżyć za pomocą konstrukcji dostępnej także poza profesjonalnym laboratorium. Autorka, uczennica drugiej klasy liceum w Płocku, opisuje detektor mionów zbudowany własnoręcznie z dwóch tub Geigera-Müllera, bariery ołowiano-miedzianej i układu rejestracji impulsów. Prosty pokaz prowadzi od promieniowania kosmicznego i promieniowania tła do szczególnej teorii względności, pokazując, że ślady cząstek z górnych warstw atmosfery można badać także szkolnymi metodami.

SKĄD SIĘ BIORĄ MIONY NA ZIEMI?

Miony to jedne z wielu cząstek elementarnych będących częścią Modelu Standardowego. Niemal wszystkie ich właściwości (spin, ładunek, oddziaływanie) są identyczne z tymi, jakie mają elektrony. Są jednak 207 razy masywniejsze niż elektrony^[1] i w przeciwieństwie do elektronów są niestabilne – ich średni czas życia τ wynosi około 2,2 mikrosekundy^[2]. Istnieją też miony o ładunku dodatnim, które nazywamy antymionami.

Do badania mionów nie są potrzebne akceleratory cząstek, ponieważ są one nieustannie wytwarzane w ziemskiej atmosferze – stanowią jeden z produktów oddziaływania promieniowania kosmicznego pierwotnego z jądrami atomów gazów atmosferycznych. Miony wyprodukowane w taki sposób posiadają dodatkowo ogromną energię kinetyczną (około 6 GeV) oraz osiągają prędkości relatywistyczne (aż do 99,9% prędkości światła w próżni, czyli $v = 0,999c$). Gdyby zanegować wpływ efektów relatywistycznych, miony wytwarzane w atmosferze byłyby w stanie przemierzyć dystans średnio około kilkuset metrów:

$$s = v\tau = 0,999c \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \times 0,0000022[\text{s}] = 659[\text{m}]$$

Jest to znacznie mniej niż wynosi wysokość, na której powstają (około 15 km nad poziomem morza). Dlatego statystycznie rzecz biorąc, do powierzchni Ziemi docierałyby tylko nieliczne z nich – te, których czas życia wynosiłby 20–40 μs , co jest bardzo mało prawdopodobne.

Tymczasem rejestrowany eksperymentalnie strumień mionów atmosferycznych jest znacznie większy, niż przewidyują to klasyczne (tj. nierelatywistyczne) założenia. Dzieje się tak, ponieważ miony ze względu na swoją prędkość bliską prędkości światła podlegają efektom przewidywanym przez szczególną teorię względności – dylatacji czasu i skróceniu Lorentza, co umożliwia im przemierzanie znacznie dłuższych dystansów niż przewiduje fizyka nierelatywistyczna.

Można to oszacować następująco. W układzie odniesienia związanym z powierzchnią Ziemi średni czas życia mionu jest wydłużony, a jego wartość można określić za pomocą odpowiedniego przekształcenia Lorentza:

$$\tau' = \frac{\tau}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{0,0000022[\text{s}]}{\sqrt{1 - \frac{(0,999c)^2}{c^2}}} \approx 0,0000492058[\text{s}] \approx 49,2[\mu\text{s}]$$

Natomiast z perspektywy mionu (czyli w układzie odniesienia związanym z mionem, w którym to układzie on się nie porusza) to grubość ziemskiej atmosfery ulega zmniejszeniu zgodnie z przekształceniem:

$$s' = s\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = 15000[\text{m}] \times \sqrt{1 - \frac{(0,999c)^2}{c^2}} = 670,7[\text{m}]$$

Jak widać, niezależnie od układu odniesienia efekty relatywistyczne umożliwiają mionom docieranie do powierzchni Ziemi. Pomiar strumienia mionów może więc stanowić eksperymentalne potwierdzenie szczególnej teorii względności Alberta Einsteina.

W JAKI SPOSÓB MOŻNA WYKRYWAĆ MIONY?

Z uwagi na swoją ogromną energię miony stanowią rodzaj promieniowania jonizującego. Metodą stosowaną do wykrywania mionów jest najczęściej użycie liczników

1 P. J. Mohr, D. B. Newell, B. N. Taylor, E. Tiesinga, „CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2022”, *Reviews of Modern Physics* 97, 025002 (2025), DOI: 10.1103/RevModPhys.97.025002

2 J. Beringer et al. (Particle Data Group), „Review of Particle Physics”, *Physical Review D* 86, 010001 (2012), DOI: 10.1103/PhysRevD.86.010001.

scyntylacyjnych opartych na scyntylatorach (specjalnych materiałach wrażliwych na promieniowanie jonizujące) i fotopowielaczach. Scyntylatory emitują błyski światła o intensywności proporcjonalnej do energii cząstki, która wchodzi z nimi w interakcję. Liczniki scyntylacyjne są bardzo precyzyjne, ale też stosunkowo drogie (a im lepsze, tym droższe). Z tego powodu do detekcji mionów w tym projekcie zdecydowano się użyć znacznie bardziej przystępnych cenowo detektorów promieniowania – tub Geigera-Müllera, będących głównym elementem liczników Geigera-Müllera.

Tuby Geigera-Müllera działają na prostej zasadzie. Są one wypełnione gazem szlachetnym pod bardzo niskim ciśnieniem, a wewnątrz generowane jest silne statyczne pole elektryczne za pomocą dwóch elektrod: metalowej ścianki tuby oraz drutu przechodzącego przez środek tuby. Gdy cząstka promieniowania jonizującego przedostanie się przez tubę i dokona jonizacji gazu, powstaje wyładowanie lawinowe (tzw. wyładowanie Townsenda), co generuje impuls napięcia w obwodzie elektrycznym.

Oprócz mionów wykrycie w liczniku może być spowodowane przez inne źródła (nazywane tłem eksperymentalnym), takie jak naturalne promieniowanie ziemskie, reszta promieniowania kosmicznego, szum aparatury bądź pozostałości izotopowe po katastrofach jądrowych.

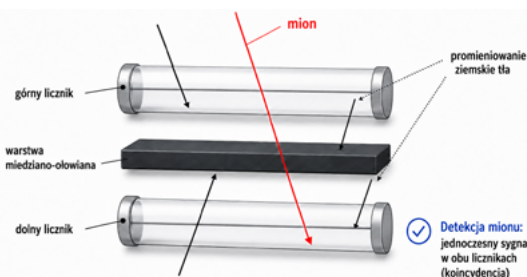
W przeciwieństwie do liczników scyntylacyjnych liczniki Geigera-Müllera nie umożliwiają rejestracji energii cząstki, która spowodowała jonizację, ponieważ amplituda impulsu jest praktycznie niezależna od energii cząstki inicjującej wyładowanie. Z tego powodu potrzebna jest inna (niż pomiar energii cząstek) metoda odróżnienia mionów od innych rodzajów promieniowania obecnego na powierzchni Ziemi.

By dokonać takiej filtracji, należy wykorzystać charakterystyczną cechę mionów: ich ogromną energię kinetyczną. Podczas gdy cząstki tła eksperymentalnego rzadko mają energię przekraczającą 3 MeV^[3], średnia energia mionów wytwarzanych w atmosferze wynosi na poziomie morza 4 GeV^[4], czyli ponad tysiąc razy więcej. Zdolność przenikania mionów przez materię jest w takim razie dużo większa niż pozostałych rodzajów promieniowania stanowiących część tła.

Z tego powodu zbudowany przeze mnie licznik mionów wykorzystuje dwie tuby Geigera-Müllera ustawione jedna pod drugą i rozdzielone płytką ołowiano-miedzianą. Detekcja mionu następuje wtedy, gdy oba liczniki zarejestrują impuls niemal jednocześnie (w bardzo krótkim odstępie czasu), co nazywamy koincydencją czasową. Tło eksperymentalne znacznie rzadziej powoduje takie jednoczesne zdarzenia, ponieważ albo nie posiada wystarczającej energii, aby przejść przez ścianki tuby i spowodować jonizację, albo przełatuje przez tuby pod niekorzystnym kątem, albo zbyt rzadko powoduje jonizację (jak to ma miejsce w przypadku promieniowania gamma), by wywołać koincydencję czasową. Innymi słowy, efektywność tub Geigera-Müllera jest znacznie niższa dla takich rodzajów promieniowania niż dla mionów, które dysponują energią rzędu GeV i z łatwością przenikają cienkie ścianki tuby Geigera-Müllera oraz jonizują gaz (do czego wystarczy zaledwie kilka lub kilkanaście eV).

Obydwa liczniki są umieszczone równolegle do powierzchni Ziemi tak, by jak największa ich powierzchnia

była skierowana w stronę górnych warstw atmosfery, ponieważ wtedy strumień mionów będzie największy. Im bowiem większy kąt nachylenia osi tuby do powierzchni Ziemi, tym większy dystans miony mają do pokonania od krańców atmosfery do układu pomiarowego. Płytką ołowiano-miedzianą stanowi dodatkową barierę przed niskoenergetycznym tłem (promieniowaniem beta i elektronami wtórnymi oraz niskoenergetycznym promieniowaniem gamma).



Rys. 1. Schemat działania dwóch liczników.

Rys. 1 wizualizuje działanie detektora. Czarne trajektorie symbolizują tło eksperymentalne, które posiada znikomą szansę wywołania koincydencji czasowej. Czerwona trajektoria symbolizuje mion, którego energia pozwala na przedostanie się przez warstwę ołowiano-miedzianą oraz jonizację gazu w obu licznikach niemal jednocześnie. Dzięki takiej konstrukcji detekcję mionu sygnalizuje prawie jednoczesne jego zarejestrowanie w obu tubach.

Do budowy przyrządu wykorzystano tuby Geigera-Müllera modelu CAJOE, często sprzedawane w Internecie jako zestaw z gotową płytką elektroniczną. Charakteryzują się one niską czułością na niskoenergetyczne promieniowanie jonizujące, co stanowi zaletę, ponieważ wspomaga filtrację tła eksperymentalnego. Całość wraz z płytą ołowiano-miedzianą została umieszczona na stojaku wydrukowanym z bioplastiku.

Rejestracja wykryć odbywa się na dwa sposoby. Pierwszy to świeące diody LED będące częścią obwodu elektrycznego: emitują one błysk światła za każdym razem, kiedy odpowiadający im licznik wykryje cząstkę. Jeśli więc obie diody zaświecą niemal jednocześnie, stanowi to silną przesłankę do wykrycia mionu.

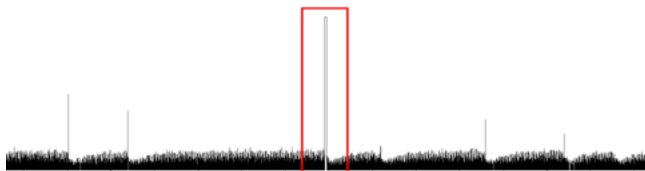


Rys. 2. Urządzenie wykrywające mion – świecą się obie diody. W przypadku wykrycia promieniowania ziemskiego tła, zaświeci się jedynie jedna dioda.

Drugi sposób polega na wykorzystaniu dodatkowego obwodu sumującego impulsy elektryczne emitowane przez licznik podczas wykryć. Za pomocą aplikacji PRA służącej do analizy danych z liczników scyntylacyjnych lub liczników Geigera-Müllera można rejestrować impulsy odpowiadające koincydencjom jako dwa razy wyższe (ze względu na dodanie się dwóch sygnałów), bądź szersze (ze względu na niewielkie

3 Z. Wu, B. Wang, J. Sun, Y. Wang, C. Zhao, „In-situ γ -ray analysis of ground surface radioactivity using portable HPGe γ spectrometer”, *Scientific Reports* 12, 9418 (2022), DOI: 10.1038/s41598-022-13770-5.

4 K. Nakamura et al. (Particle Data Group), „Review of Particle Physics”, *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics* 37, 075021 (2010), DOI: 10.1088/0954-3899/37/7A/075021, dział 24.3.



Rys. 4. Analiza w programie ukazująca różnicę między pojedynczymi pulsami spowodowanymi przez inne rodzaje promieniowania tła, a pulsem spowodowanym przez wykrycie mionu.

opóźnienie między sygnałami i tzw. czas martwy liczników Geigera-Müllera, czyli czas potrzebny na dejonizację gazu po poprzednim wyładowaniu lawinowym i przygotowanie licznika do kolejnej jonizacji).

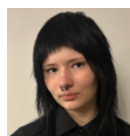
Obydwie opcje stanowią bardzo łatwy do interpretacji sposób sygnalizacji zdarzeń koincydencyjnych, dzięki czemu przyrząd może służyć do celów edukacyjnych i popularnonaukowych. Zamiast obwodu sumującego impulsy elektryczne można zastosować obwód koincydencyjny opracowany przez Bruna Rossiego. Stanowi on dokładniejszą metodę wykrywania dwóch impulsów pojawiających się w krótkim odstępie czasu i jest szeroko stosowany w eksperymentach fizyki cząstek.

WYNIKI ORAZ WNIOSKI

Podczas kilkugodzinnej pracy urządzenia zaobserwowano średnio 1,2 zdarzenia koincydencyjnego na minutę. Taki wynik nie jest stałą wartością dla urządzenia, ponieważ strumień mionów docierających do powierzchni Ziemi jest zależny

od warunków atmosferycznych, takich jak temperatura powietrza i ciśnienie, a także wysokość nad poziomem morza. Liczba mionów wykrywanych przez zbudowane przeze mnie urządzenie jest zgodna z modelami uwzględniającymi wpływ efektów relatywistycznych oraz z danymi zgromadzonymi przez inne eksperymenty badające miony wytwarzane w atmosferze^[5]. Dodatkowo urządzenie można wykorzystać do badania zależności strumienia mionów od kąta nachylenia, co umożliwia jeszcze bardziej precyzyjne pomiary weryfikujące szczególną teorię względności (poprzez analizę wpływu długości drogi przebywanej przez miony w atmosferze na ich liczbę wykrywaną na poziomie morza). Największym atutem tej konstrukcji jest jednak dostępność materiałów oraz stosunkowo prosta zasada działania. Dzięki temu jest idealnym narzędziem do przeprowadzania popularnonaukowych oraz amatorskich eksperymentów, podobnie jak detektory mionów używane do demonstracji, takie jak CosmicWatch bądź CosmicPi oparte na scyntylatorach.

AUTORKA



Antonina Siótkowska jest uczennicą Liceum Ogólnokształcącego im. Władysława Jagiełły w Płocku. W 2026 roku została laureatką konkursu „Fizyczne Ścieżki”, zapewniając sobie możliwość stażu badawczego w Narodowym Centrum Badań Jądrowych i Instytucie Fizyki PAN. W przyszłości chciałaby zobaczyć Wielki Zderzacz Hadronów i poznać dokładniej zjawisko produkcji par.

⁵ M. Aglietta et al. (LVD Collaboration), „Single muon angular distributions observed in the LVD particle astrophysics experiment”, *Astroparticle Physics* 2, 103–116 (1994), DOI: 10.1016/0927-6505(94)90033-7

KTO TO ZAMÓWIŁ?

Kiedy w latach 30. XX wieku odkryto w promieniowaniu kosmicznym cząstkę podobną do elektronu, lecz około 200 razy od niego cięższą, fizycy nie bardzo wiedzieli, co z nią zrobić. Elektron był potrzebny do zrozumienia budowy atomów, proton i neutron tworzyły jądra, neutrino ratowało zasadę zachowania energii w rozpadzie beta. A mion? Nie budował zwykłej materii, nie tworzył chemii, nie pasował do ówczesnego obrazu świata. Stąd słynne pytanie urodzonego w Rymanowie na Podkarpaciu Noblisty z fizyki Isidora Rabięgo: „Kto to zamówił?”

Dziś wiemy, że właśnie ta pozorna zbędność była jego największym atutem. Odkrycie mionu pokazało, że świat cząstek elementarnych nie kończy się na składnikach znanej nam materii. Jest on cięższym krewnym elektronu: ma taki sam ładunek elektryczny i spin, należy do tej samej rodziny leptonów, ale jest znacznie masywniejszy i nietrwały. Żyje średnio około 2,2 mikrosekundy, po czym rozpada się na elektron oraz neutrino.

Miony „spadają” na nas z nieba – powstają w atmosferze, gdy wysokoenergetyczne cząstki promieniowania kosmicznego zderzają się z jądrami atomów powietrza. Wtórne cząstki rozpadają się następnie na miony, które docierają do powierzchni Ziemi. W każdej sekundzie przechodzą także przez nasze ciała, choć oczywiście bez detektorów nie jesteśmy w stanie ich zauważyć.

Ich obecność przy powierzchni Ziemi jest jednym z najładniejszych przejawów szczególnej teorii względności. Gdyby czas płynął dla nich tak samo jak dla obserwatora na Ziemi, większość mionów rozpadłaby się wysoko w atmosferze. Ponieważ jednak poruszają się z prędkościami bliskimi prędkości światła, ich czas życia w naszym układzie odniesienia ulega wydłużeniu. Prosty licznik mionów staje się więc małym laboratorium relatywistycznym.

Miony odegrały też ważną rolę w rozwoju fizyki cząstek. Elektron, mion i odkryty później taon tworzą trzy podobne, lecz różniące się masą cząstki. Ich istnienie prowadzi do pytania, dlaczego natura powtarza rodzinę leptonów w kolejnych generacjach. To jedna z głębszych zagadek Modelu Standardowego.

Szczególne znaczenie mają precyzyjne pomiary momentu magnetycznego mionu. Mion zachowuje się jak maleńki magnes, a jego własności można obliczać z ogromną dokładnością w ramach kwantowej teorii pola. Każda, nawet bardzo mała różnica między przewidywaniem a eksperymentem może być sygnałem, że w znanej teorii czegoś jeszcze brakuje.

Miony znalazły też zastosowania praktyczne. Dzięki dużej przenikliwości można wykorzystywać je do obrazowania wnętrza wielkich obiektów: wulkanów, piramid, reaktorów czy konstrukcji inżynierskich. Źródłem promieniowania nie jest wtedy urządzenie laboratoryjne, lecz kosmos.

Mion uczy, że postęp w fizyce często zaczyna się od kłopotliwego szczegółu. Pojawia się coś, czego nikt nie przewidział i co nie pasuje do gotowego porządku. Dopiero później okazuje się, że właśnie ten element otwiera nowy rozdział.